沙柳直根抗拉特性对循环荷载的响应

胡晶华[1]，刘　静[1]，白潞翼[1]，张　欣[2]，兰鹏波[1]，袁亚楠[1]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古　呼和浩特　010019；
2. 水利部牧区水利科学研究所，内蒙古　呼和浩特　010020）

摘　要：为揭示风力侵蚀区植物长期遭受大风使其根系反复受力后的固土性能，以神东矿区广泛分布的水土保持植物种沙柳（*Salix psammophila*）为研究对象，采用TY8000伺服式强力机对1~5 mm径级沙柳直根进行轴向循环荷载试验，探究直根抗拉特性对模拟大风拉拔产生的反复加载-卸载作用的响应。结果表明：(1) 承受循环荷载后直根极限抗拉力与根径呈幂函数正相关，抗拉强度与根径呈幂函数负相关，与单次荷载下直根抗拉力、抗拉强度-根径关系相似。(2) 承受循环荷载后各径级直根抗拉力、抗拉强度较单次荷载均有所增强且差异显著($P<0.05$)，1~2 mm、2.5~3.5 mm、4~5 mm直根抗拉力、抗拉强度分别增长了60%、60%，48%、50%，31%、32%。(3) 直根力-位移曲线在循环过程中表现出明显的周期循环特征，随循环次数增加，滞回环间距逐渐闭合，由加载段-卸载段曲线组成的滞回环面积随之减小，抵抗塑性变形能力越来越差，最后趋之稳定。直根累计伸长率随循环次数的增加而增长，分为快速增长阶段和缓慢增长阶段。(4) 承受单次荷载和循环荷载后，直根弹性应力、极限应力、弹性模量与根径呈负相关，累计弹性应变、极限应变与根径无关系；承受循环荷载后，直根弹性应力、极限应力、累计弹性应变明显增大，极限应变则表现为：单次荷载>循环荷载，弹性模量在不同荷载下无规律性。综上所述，沙柳根系在承受一定程度的营力低周循环荷载后，能够更加适应外界环境，增强对侵蚀营力的抵抗能力，更有利于植物根系发挥固土效能。

关键词：直根段；循环荷载；抗拉强度；变形特征；沙柳

由于气候及地质因素，内蒙古中西部地区生态环境十分脆弱，极易发生严重的风蚀和水蚀，加之频繁开采煤炭资源，导致地表塌陷、土地退化、植被稀少，使水土流失加剧[1]。植物措施在生态治理和侵蚀防控中被认为是最有效、最根本的手段，根系在土体中纵横交错，是植物与土壤直接进行物质交换的重要器官，强大的根系网络不仅可以稳定植物生长，还对土体起到固结和支撑的作用，有效抵御侵蚀和防止水土流失[2]，国内外大量研究结果已经证实根系固土力学机理主要体现在植物单根抗拉力学特性[3-6]、变形特征[7-9]等材料力学特性以及根系改善土壤环境的土工特性[10-12]等方面，但这些研究着眼于根系在单次荷载作用产生瞬时破坏时所发挥的极限力学特性。而在干旱、半干旱地区，除对根系形成瞬时破坏外，更多的是植物遭受大风反复摆动等多种反复荷载，通过地上茎叶为媒介传至地下根系，使根系承受反复的加载-卸载作用。目前，国内外对循环荷载后疲劳性能的研究主要集中于工程材料[13]，具有生命特征的根系承受循环荷载后材料力学性能的研究较少，吕春娟[14]、穆枫[15]等研究轴向循环荷载对油松（*Pinus tabulaeformis*）、侧柏（*Platycladus orientalis*）乔木根系抗拉力学特性的影响，以及李瑞燊等[16]对小叶锦鸡儿（*Caragana microphylla*）直根反复施加径向循环荷载后其抗拉剪组合力学特性进行了探讨。以上研究表明，反复循环受力会导致植物根系材料力学特性发生改变，进而直接影响植物根系的固土力学特性。不同植物种根系力学性能存在明显的种间差异，对轴向循环荷载的响应过程和特征也不尽相同，明确不同植物尤其是常用水土保持树种根系在循环荷载作用下的强度特征和变形特点，是评价植物固土抗蚀能力和治理水土流失的关键要素。为此，本研究以半干

收稿日期：2021-04-30；　**修订日期：**2021-08-17
基金项目：内蒙古科技计划项目“呼包鄂榆生态功能区发挥根系持续固土力学特性的精准植被建设技术”(201802107)
作者简介：胡晶华(1995-)，女，硕士研究生，主要从事水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: hujinghua111@163.com
通讯作者：刘静. E-mail: ljing58@126.com

旱区典型水土保持树种沙柳根系为研究对象，采用反复加载-卸载方式，研究沙柳直根承受轴向循环荷载后抗拉力、抗拉强度、变形特征等材料力学特性，以期充实根系可持续固土体系，为生态环境修复提供理论依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古伊金霍洛旗与陕西省神木市交界处的采煤塌陷治理区，地处毛乌素沙地和黄土高原过渡地带，地理坐标为110°00′~110°24′E，39°11′~39°29′N，海拔高度约为1100~1250 m。该区域属温带半干旱大陆性季风气候，年均降水量300~500 mm，降水集中且强度大，主要集中于夏秋季。土壤类型多为沙质土，结构松散，通气性强，保水保肥能力差。研究区主要植物种有小叶锦鸡儿、紫穗槐（*Amorpha fruticosa*）、沙棘（*Hippophae rhamnoides*）、黑沙蒿（*Artemisia ordosica*）、爬地柏（*Sabina procumbens*）等。沙柳属于速生植物，根系繁大，有大量的毛根、细根和侧根向四周延伸，固沙保水能力强，是该区域生态治理的优势种。

1.2 试验根的采集与制备

在研究区内选择长势良好的沙柳群落，随机选取30株并测量每株株高、冠幅、地径，计算均值作为标准株指标（株高：1.61±0.16 m；冠幅：1.47±0.22 m^2；地径：1.62±0.21 cm），选取与标准株相近的植株进行根系采集。为了防止植株死亡，采用局部挖掘法将试验株部分根系挖出，将其放入低温容器中带回实验室，试验在采样后一周内完成以保证试验根活性。

选取径级为1~5 mm直根进行制备（图1），试验段AB长为4 cm，两端阴影部分为夹具加持部分。使用精度为0.01 mm电子游标卡尺对试验根中心点O及中心点两端A、B点进行根径测量（图1），每个点直径需用十字交叉法测量2次，取3点平均值作为该试验根的平均根径。目前已有大量试验证明根系直径与抗拉力的关系，本试验重点研究不同荷载对沙柳直根抗拉特性的影响，因此在不影响精确度的条件下减小工作量，将径级组划分为1~2 mm、2.5~3.5 mm、4~5 mm。每个径级组制备40条试验根（试验根在单次荷载和循环荷载下重复数均为20条）。

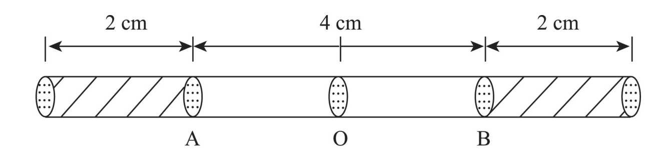


图1 试验根示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test root

1.3 试验方法

1.3.1 *抗拉试验方法* 试验时间为2019年7月，将每个径级组制备好的40条试验根分为2组，A组进行轴向单次荷载试验，B组进行轴向循环荷载试验。首先将A组试验根采用TY8000伺服控制试验机（精度为0.01 N，速度1~1000 mm·min^{-1}）进行单次荷载试验，以10 mm·min^{-1}加载速度匀速拉伸直至断裂，记录其极限抗拉力并拟合极限抗拉力-根径回归方程（$Y_{单}=21.612X_{单}^{1.6743}$，$R^2=0.9214$）。再将B组试验根的直径（$X_{循}$）依次带入单次荷载下拟合极限抗拉力-根径回归方程，计算各个试验根的拟合极限力（$Y_{循}$），以各个试验根拟合极限力的70%（沙柳根系临近破坏且远远超过弹塑性极限点的力大约在拟合极限力的70%）设为最大循环应力，最小循环应力设为0 N。试验根承受轴向循环荷载路径如下：以10 mm·min^{-1}的加载速度将直根段从0 N加载到该试验根拟合极限力的70%，再将其卸载至0 N，完成第1次循环过程，以此类推，循环次数设定为50次，第51次将试验根拉断，进行1次循环试验所需时间大概为4分30秒，记录循环荷载后的极限抗拉力，抗拉强度为破坏处单位横截面积上的抗拉力，公式如下：

$$P=4F/\pi D^2 \tag{1}$$

式中：P为极限抗拉强度（MPa）；F为极限抗拉力（N）；D为试验根根径（mm）。

1.3.2 *变形特征方法* 根据循环试验中仪器自动记录每次循环试验根产生的位移，计算试验根累计伸长率。公式如下：

$$\gamma=\Delta L/L\times100\% \tag{2}$$

式中：γ为循环过程中累计伸长率（%）；ΔL为每次循环试验根拉伸的伸长长度（mm）；L为试验根初始长度，即试验段部分（L=4 cm）。

1.3.3 *本构特征值的计算* 通过试验根在单次荷载和循环荷载下得到的极限力-位移曲线，计算试验

根的应力应变，见公式（3）、（4），绘制应力-应变曲线，并对本构曲线进行分析，本构曲线上试验根弹性极限点处的应力应变为弹性应力、弹性应变，试验根发生断裂承受最大力时的应力应变为极限应力、极限应变。并计算弹性模量，弹性模量为试验根在弹性变形阶段其弹性应力和弹性应变的比值，见公式（5）。

$$\sigma_r = 4F_r/\pi D^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = S_r/40 \times 100\% \quad (4)$$

$$E_r = \sigma_r/\varepsilon_r \quad (5)$$

式中：σ_r为应力（MPa）；F_r为抗拉力（N）；D为试验根平均直径（mm）；ε_r为应变（%）；S_r为试验根受拉发生的位移（mm）；E_r为弹性模量（MPa）。

1.4 数据处理

采用Excel 2010和SPSS 20.0软件对数据进行统计整理，Origin软件对数据进行制图。使用最小显著极差法（LSD）检验沙柳直根承受不同加载方式下极限抗拉力、抗拉强度的差异性。

2 结果与分析

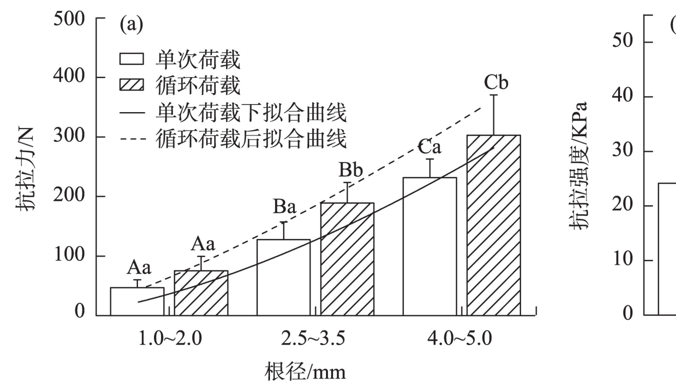
2.1 直根强度特征对循环荷载的响应

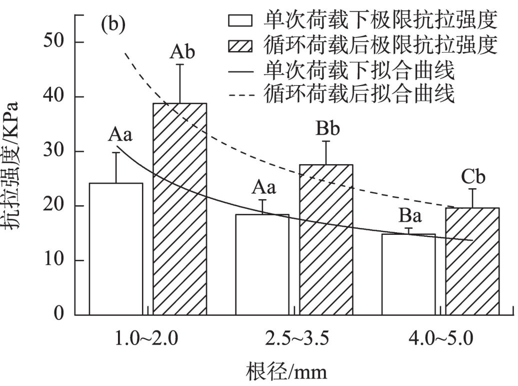
图2为单次荷载和循环荷载作用下，沙柳直根的极限抗拉力、抗拉强度。由图2a可知，承受循环荷载后直根极限抗拉力与根径呈幂函数正相关（$Y=39.989X^{1.3747}$，$R^2=0.9315$），与单次荷载下直根抗拉力与根径关系（$Y=21.612X^{1.6743}$，$R^2=0.9214$）趋势相同，且单次荷载和循环荷载下直根抗拉力差异显著（$P<0.05$）。但循环荷载后直根抗拉力明显大于单次荷载下直根的抗拉力，随根径的增加，其增幅逐渐增大；相较于单次荷载，1~2 mm、2.5~3.5 mm、4~5 mm直根承受循环荷载后平均抗拉力增长了60%、48%、31%。

由图2b可知，单次荷载下直根极限抗拉强度与根径呈幂函数负相关（$Y=29.2X^{-0.453}$，$R^2=0.7204$），循环荷载后抗拉强度与根径的关系没有发生改变，即承受循环荷载50次后，直根极限抗拉强度与根径仍表现为幂函数负相关（$Y=50.915X^{-0.625}$，$R^2=0.7379$），且2种荷载下直根极限抗拉强度差异显著（$P<0.05$）。循环荷载后直根抗拉强度明显增强，其增幅随根径的增大而减小，相较于单次荷载，1~2 mm、2.5~3.5 mm、4~5 mm直根承受循环荷载后平均抗拉强度增长了60%、50%、32%，表明根系能够承受一定程度的循环荷载，且循环荷载后根系固土抗蚀能力增强。

2.2 循环荷载过程中直根变形特征

直根承受循环荷载50次后力-位移曲线变化规律相似，因此，以根径2.88 mm直根为例，由图3可知，直根在循环荷载作用下表现出明显的弹塑性特征，可分为弹性形变和塑性形变两部分。首次加载-卸载曲线均与其余加载-卸载曲线存在差异，首次加载时，曲线呈明显的上凸型，总位移量达到2.04 mm，卸载后曲线并未沿着加载段路径返回，而是滞后于加载段路径，其中滞后位移为1.13 mm，此间距为不可恢复的塑性形变，0.91 mm为可恢复的弹性形变。随着循环次数的增加，由加载段-卸载





注：不同大写字母表示同一加载方式不同径级间直根抗拉力、抗拉强度差异显著（$P<0.05$）；不同小写字母表示同一径级不同加载方式下直根抗拉力、抗拉强度差异显著（$P<0.05$）。

图2 循环荷载前后直根极限抗拉力、抗拉强度

Fig. 2 Tensile force, tensile strength of straight roots before and after cyclic load

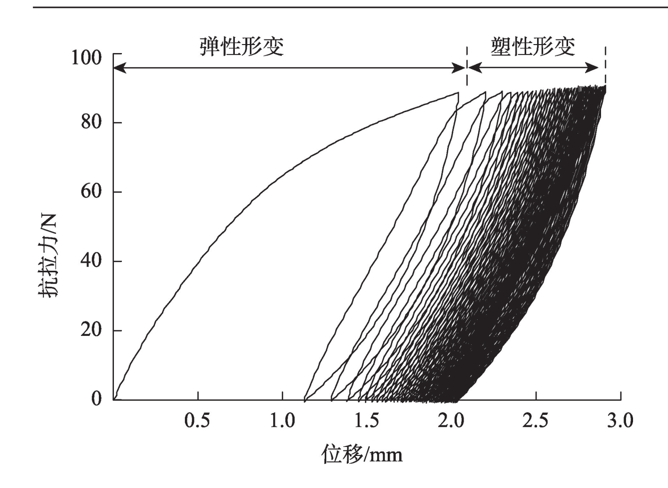


图3 循环荷载后直根力-位移曲线

Fig. 3 Tensile force-displacement curve of straight roots after cyclic load

段曲线组成的滞回环逐渐闭合，斜率均大于首次加载，并表现出明显的周期性，曲线排列方式由"稀疏性"变为"密集型"，由加载段-卸载段曲线组成的滞回环面积随之减小，表明根系塑性形变逐渐积累，但每1次循环产生的塑性形变逐渐减小并趋于稳定。

为了定量描述直根在循环过程中的变形特征，将直根累计伸长率与循环次数的关系进行分析。由图4可知，在不同根径下，直根累计伸长率随循环次数的增加呈现逐渐增长的趋势，初始阶段直根累计伸长率变化幅度大，随之增长缓慢并趋于稳定。1~2 mm、2.5~3.5 mm、4~5 mm直根承受循环荷载50次后总伸长率分别为7.2%、2.8%、7.7%，第1次循环结束后直根伸长率是总伸长率的71.8%、45.4%、57.4%，第10次循环结束后直根累计伸长率是总伸长率的88.2%、73.6%、80.8%，第20次循环结束后直根累计伸长率均达到总伸长率的85%以上，因此，在循环荷载过程中，直根累计伸长率分为快速增长和缓慢增长阶段，循环20次可作为快速增长向缓慢增长的拐点。

2.3 单次荷载与循环荷载后直根本构特征

由图5可知，直根应力-应变曲线在单次荷载作用下呈上凸型，受力初期应力与应变为线性正相关，且各点斜率相等，此阶段主要发生弹性形变；当应力达到弹性极限点时，直根开始发生不可恢复的塑性变形，表现为应变随着应力的增加快速增大，曲线趋于平缓且斜率基本不变，呈现非线性变形特征。承受循环荷载后，直根应力应变曲线初期与单次荷载存在差异，由于循环荷载过程中直根已产生塑性形变，因此直根再次受力至断裂时，曲线沿着循环过程中加载段路径进行，直到达到循环过程中上限荷载，其拐点明显大于单次荷载，即承受循环荷载后，直根弹性应力、累计弹性应变均有所增加，超过上限荷载后曲线斜率迅速减小，后期与单次荷载下直根曲线相似。

由表1可知，承受单次荷载和循环荷载后，直根平均弹性应力、极限应力和弹性模量均随根径的增大而减小，而单次荷载下弹性应变、极限应变以及循环荷载下累计弹性应变、极限应变均和根径无明显关系，表明在相同荷载下，1~2 mm根系表现出更好的弹性性能，抵抗弹性变形的能力强。

直根弹性应力、极限应力、弹性应变在不同根

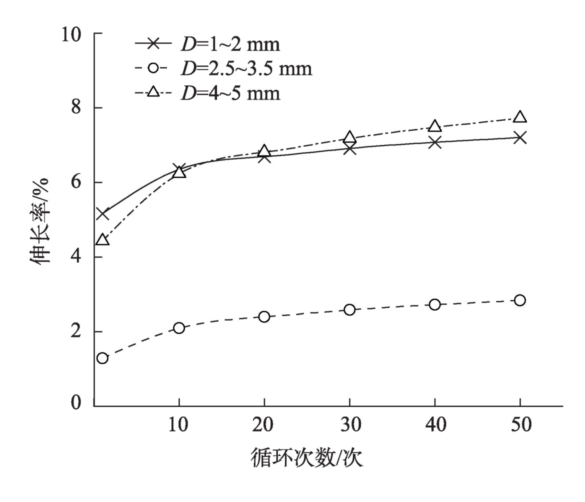


图4 直根累计伸长率与循环次数的关系

Fig. 4 Relationship between accumulated elongation of straight roots and the cycle number

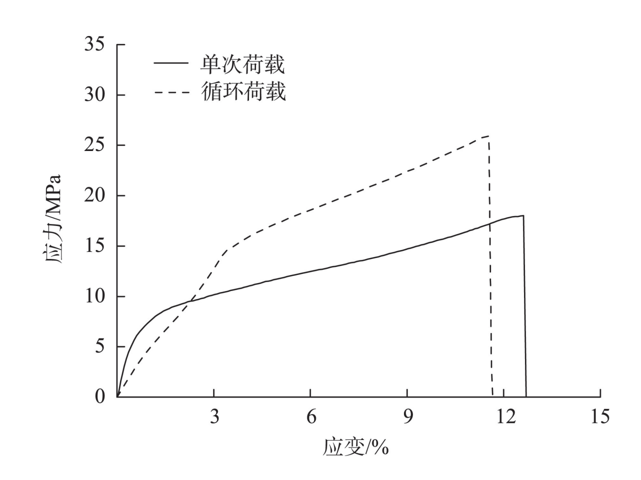


图5 单次荷载和循环荷载后直根极限应力-应变曲线

Fig. 5 Ultimate stress-strain curve of straight roots under monolonic load and cyclic load

表1　单次荷载和循环荷载后直根本构特征值

Tab. 1　Elgenvalue of stress-strain curve of straight roots under monolonic load and cyclic load

加载方式	根径/mm	弹性应力/MPa	极限应力/MPa	弹性应力占比/%	弹性应变/%	极限应变/%	弹性应变占比/%	弹性模量/MPa
单次荷载	1~2	6.31	24.69	21	0.94	13.67	7	8.95
	2.5~3.5	6.24	20.16	31	1.28	13.36	10	8.81
	4~5	6.06	15.53	38	0.80	14.58	6	7.81
循环荷载	1~2	15.71	38.92	40	2.58	10.73	23	11.61
	2.5~3.5	15.41	29.11	61	2.45	11.11	24	8.20
	4~5	10.61	21.64	49	3.28	14.25	26	3.74

注:循环荷载下弹性应变为累计弹性应变。

径下均表现出:循环荷载>单次荷载;承受循环荷载后,根径为1~2 mm、2.5~3.5 mm、4~5 mm的直根弹性应力分别是单次荷载的2.49、2.47、1.75倍,极限应力是单次荷载的1.58、1.44、1.39倍,累计弹性应变是单次荷载的2.74、1.91、4.10倍,弹性应力占比、弹性应变占比也相应程度的增加,而极限应变与其他本构曲线特征值存在差异,即单次荷载下直根的极限应变大于循环荷载,且差异显著($P<0.05$)。由于直根不同组织结构的弹性势能和塑性变形具有差异性,增幅程度受自身结构影响也各不相同,使得弹性模量在不同荷载下没有明显的规律性。

3 讨 论

3.1 循环荷载对直根极限力和强度的影响

植物根系承受风力吹蚀等自然界的低周侵蚀营力时会产生疲劳现象,由于根系反复承受循环拉伸作用使其微观结构发生变化,因此根系材料力学特性必会发生改变。本研究对1~5 mm根径沙柳直根施加轴向循环荷载50次后,其抗拉能力均有所提升,与穆枫等[15]研究油松、侧柏根系循环受力后材料力学特性的结果相似,盖小刚[17]同样得出油松、落叶松、白桦和蒙古栎根系经过轴向循环荷载后的极限抗拉力、抗拉强度显著大于单次荷载下极限抗拉力、抗拉强度,说明根系在一定程度上能够承受外界低周循环荷载,且自身极限抗拉力学特性不但没有受损减弱,反而更有利于植物根系固土能力的增强。这可能是因为根系在反复受拉过程中细胞不断被挤压导致水分含量减少,从而增强了细胞壁聚合物之间的键合强度,使根系在循环荷载后表现出更优良的抗拉性能[18]。Zhang等[19]研究阿尔泰紫菀(*Heteropappus altaicus*)和硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)根系抗拉力学特性与含水量的关系时得出相同规律,即直根抗拉强度随含水量的减小而显著增强。另一方面,根系直径、含水量与根截面管孔孔径有密切的联系,在循环受拉和含水量减小的情况下,根系直径会发生微弱减小,从而根系内部的管孔孔径减小,使根系在单位面积上承受拉力的实质面积增大,因而根系抗拉强度有所增强[20]。Jaffe[21]研究表明,植物受到机械刺激干扰后是不容易再次受到损伤的,也就是说根系经过循环荷载作用后,更加适应外界环境,反而增强了对侵蚀营力的抵抗能力,使根系发挥更好的固土效能。

3.2 循环荷载后直根的变形特征

根系在抵御风力侵蚀的过程中,通过发生形变使所受拉力转化为侧摩阻[22],从而防止土体发生位移或变形,因此根系变形特征是衡量植物根系固土力学的重要指标[23]。本研究中,1~5 mm根径沙柳直根伸长率随循环次数的增加而增大,且根系累计伸长率增长趋势以循环20次为拐点划分为2个阶段:快速增长阶段和缓慢增长阶段。吕春娟等[14]研究油松根系应变与循环次数的关系时,得出相似规律。从能量守恒角度分析,随着循环次数的增加,外力对植物根系所做的功随之增大,除了一部分以弹性势能储存的能量在外力卸载时被全部释放以外,还有一部分能量则引起根系局部塑性变形[16],也就是说,根系的累计伸长率随外力做功增大而相应增大。但是根系内部各组分的机械强度抵抗拉伸破坏的能力存在差异,当根系受到拉伸作用时,破坏顺序从强度较低的组织到强度较高的组织,即从根系最外部的周皮开始,依次为次生韧皮部、次生木质部[24]。次生韧皮部主要由韧皮纤维组成,韧皮纤维细胞较长,细胞壁富含纤维素,坚韧而有弹性,常表现有较大的延伸率[25],导致根系在循环受

力初期表现出累计伸长率快速增长、弹性势能高、塑性变形明显等特征，这也是承受循环荷载后，根系再次受力时其弹性应力、累计弹性应变大于单次荷载的原因，这些特征有利于将根系所受拉力向土体深层传递，对土壤下滑力进行缓冲。由于根系抵抗侵蚀营力过程中平衡位置不断改变从而引发损伤的累积[26]，即使反复施加的轴向拉力是恒定的，但次生韧皮部经过一段时间后仍会发生破坏，这时，次生木质部在抵抗拉力的过程中发挥主要作用。存在于木质部中的木纤维，其细胞较韧皮纤维稍短，胞腔狭长，木纤维壁厚而坚硬且高度木质化，具有良好的机械巩固作用，但韧性降低、延伸率较小[24]，经过循环荷载后的根系已产生塑性变形，发生不同程度的损伤，使得根系极限应变小于单次荷载，根系的伸长率由快速增长转为缓慢增长，循环塑性逐渐饱和，滞回环逐渐闭合且越来越稳定，F-S曲线呈现出先疏后密的趋势。

4 结 论

（1）1~5 mm根径沙柳直根承受50次轴向循环荷载后极限抗拉力与根径呈幂函数正相关，抗拉强度与根径呈幂函数负相关，均与单次荷载直根抗拉力、抗拉强度和根径关系相似；但循环荷载后1~2 mm、2.5~3.5 mm、4~5 mm直根抗拉力、抗拉强度相较于单次荷载分别增长了60%、60%，48%、50%，31%、32%。

（2）循环过程中，直根力-位移曲线表现出明显的周期循环特征，在初始阶段，由加载段-卸载段曲线组成的滞回环形状饱满，排列稀疏，随循环次数的增加，滞回环间距逐渐闭合，排列依次密集，面积随之减小，说明直根抵抗塑性变形的能力越来越差，最后逐渐趋于稳定。

（3）直根累计伸长率随循环次数的增加呈现逐渐增长的趋势，循环第20次是伸长率由快速增长向缓慢增长转变的拐点。

（4）2种荷载作用下，直根弹性应力、极限应力和弹性模量与根径呈负相关，弹性应变（循环荷载为累计弹性应变）、极限应变和根径无明显关系；但数值存在显著差异（$P<0.05$），直根弹性应力、极限应力、累计弹性应变表现为：循环荷载>单次荷载，极限应变则表现为：单次荷载>循环荷载。

参考文献（References）：

[1] Wang S M, Du H D, Wang S Q. Analysis of damage process and mechanism for plant community and soil properties at northern Shenmu subsidence mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 17−26.

[2] Bordoni M, Meisina C, Vercesi A, et al. Quantifying the contribution of grapevine roots to soil mechanical reinforcement in an area susceptible to shallow landslides[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 163(1): 195−206.

[3] Capilleri P P, Motta E, Raciti E. Experimental study on native plant root tensile strength for slope stabilization[J]. Procedia Engineering, 2016, 158(8): 116−121.

[4] Capilleri P P, Cuomo M, Motta E, et al. Experimental investigation of root tensile strength for slope stabilization[J]. Indian Geotechnical Journal, 2019, 49(6): 687−697.

[5] 白潞翼, 刘静, 胡晶华, 等. 紫穗槐直根力学性质研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1111−1119. [Bai Luyi, Liu Jing, Hu Jinghua, et al. Deformation characteristics of the straight roots of *Amorpha fruticosa*[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1111−1119.]

[6] Boldrin D, Leung A K, Bengough A G. Effects of root dehydration on biomechanical properties of woody roots of *Ulex europaeus*[J]. Plant and Soil, 2018, 431(3): 347−369.

[7] 刘昌义, 胡夏嵩, 赵玉娇, 等. 寒旱环境草本与灌木植物单根拉伸试验强度特征研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 1−10. [Liu Changyi, Hu Xiasong, Zhao Yujiao, et al. Strength characteristics of single root tensile test of herbs and shrubs in cold and arid environments[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1): 1−10.]

[8] Ouyang Q, Yang W, Zhou X , et al. Root tensile properties of the herbaceous plants for slope protection in earth-rocky mountain area, northern China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(4): 35−41.

[9] Boldrin D, Leung A K, Bengough A G. Root biomechanical properties during establishment of woody perennials[J]. Ecological Engineering, 2017, 109(11): 196−206.

[10] Saifuddin M, Osman N, Rahman M M, et al. Soil reinforcement capability of two legume species from plant morphological traits and mechanical properties[J]. Current Science, 2015, 108(7): 1340−1347.

[11] Zhang C B, Chen L H, Liu Y P, et al. Triaxial compression test of soil- root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(1): 19−26.

[12] 申紫雁, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 黄河源区高寒草地不同深度土壤理化性质与抗剪强度关系研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 392−401. [Shen Ziyan, Liu Changyi, Hu Xiasong, et al. Relationships between the physical and chemical properties of soil and the shear strength of root-soil composite systems at different soil depths in alpine grassland in the source region of the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 392−401.]

[13] Kim, Weon J, Jae Y, et al. Effect of loading rate on the fracture be-

havior of nuclear piping materials under cyclic loading conditions [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2016, 48(6): 1376−1386.

[14] 吕春娟, 陈丽华, 赵红华, 等. 油松根系的轴向疲劳性能研究[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(6): 578−585. [Lyu Chunjuan, Chen Lihua, Zhao Honghua, et al. Axial fatigue properties of *Pinus tabulaeformis* root[J]. Tribology, 2013, 33(6): 578−585.]

[15] 穆枫, 程子敏, 李玉灵, 等. 太行山区林木根系单根固土生物力学及疲劳特性研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(2): 14−21, 55. [Mu Feng, Chen Zimin, Li Yulin, et al. Study on the biomechanics and fatigue characteristics of single root soil and soil of tree roots in Taihang Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(2): 14−21, 55.]

[16] 李瑞燊, 刘静, 王博, 等. 反复施加拉剪组合力对小叶锦鸡儿直根材料力学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 121−125. [Li Ruishen, Liu Jing, Wang Bo, et al. Effects of repeated combined tension and shear forces on mechanical properties of *Caragana microphylla* root materials[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 121−125.]

[17] 盖小刚. 林木根系固土力学特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013. [Gai Xiaogang. Study of Mechanical Properties of Tree Root Reinforcing Soil[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.]

[18] Hales T C, Miniat C F. Soil moisture causes dynamic adjustments to root reinforcement that reduce slope stability[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(5): 803−813.

[19] Zhang C B, Zhou X, Jiang J, et al. Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants[J]. Catena, 2019, 172(8): 140−147.

[20] 张乔艳, 唐丽霞, 廖华刚, 等. 多花木蓝根截面微观结构对其抗拉特性的影响[J]. 植物生态学报, 2019, 43(8): 709−717. [Zhang Qiaoyan, Tang Lixia, Liao Huagang, et al. Effect of microstructure in cross section on tensile properties of *Indigofera amblyantha*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(8): 709−717.]

[21] Jaffe M J. Thigmomorphogenesis: The response of plant growth and development to mechanical stimulation: With special reference to Bryonia dioica[J]. Planta, 1973, 114(2): 143−157.

[22] 王萍花, 陈丽华, 冀晓东, 等. 4种常见乔木单根拉伸的应力应变曲线分析[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 17−22. [Wang Pinghua, Chen Lihua, Ji Xiaodong, et al. Analysis of stress-strain curves for four common arbor root systems[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 17−22.]

[23] Liu Y B, Li S X, Yu D M, et al. Experiment on single root tensile mechanical properties of typical herb species in loess region of Xining Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(15): 157−166.

[24] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 40−46. [Zhu Haili, Hu Xiasong, Mao Xiaoqing, et al. Relationship between mechanical characteristics and anatomical structures of slope protection plant root[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(5): 40−46.]

[25] 蒋坤云, 陈丽华, 盖小刚, 等. 华北护坡阔叶树种根系抗拉性能与其微观结构的关系[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 115−123. [Jiang Kunyun, Chen Lihua, Gai Xiaogang, et al. Relationship between tensile properties and microstructures of three different broadleaf tree roots in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3): 115−123.]

[26] 许金泉, 郭凤明. 疲劳损伤演化的机理及损伤演化律[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 40−46. [Xu Jinquan, Guo Fengming. Mechanism of fatigue damage evolution and the evolution law[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 40−46.]

Straight root tensile properties of *Salix psammophila* in response to cyclic loading

HU Jinghua[1], LIU Jing[1], BAI Luyi[1], ZHANG Xin[2], LAN Pengbo[1], YUAN Yanan[1]
(1. College of Desert Contral Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China; 2. Institute of Water Resources for Pasturing Area of the Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract: To clarify mechanical properties of straight roots in response to repeated loading and unloading induced by simulated high wind drawing, an axial cyclic load test was applied to straight roots of *Salix psammophila*. These roots had a diameter of 1−5 mm in the Shendong mining area and a TY8000 servo-type strong force was used to reveal the soil-fixing ability of plants in wind-eroded areas after their roots were repeatedly stressed by strong long-term winds. Results show the following: (1) the tensile force of straight roots after cyclic loading was positively correlated with the diameter based on a power function; the tensile strength after cyclic loading was negatively correlated with root diameter based on a power function, which was similar to the relationship between tensile force, tensile strength, and root diameter under a monotonic load. (2) Compared with the monotonic load, the tensile force and tensile strength after cyclic loading of straight roots of all diameters were significantly enhanced ($P<0.05$), and the tensile force and tensile strength of 1−2 mm, 2.5−3.5 mm, and 4−5 mm roots increased by 60%, 60%, 48%, 50%, and 31%, 32%, respectively. (3) In the cycle process, the force-displacement curve of straight roots showed obvious cycle characteristics with increasing cycle number; the hysteresis loop spacing is gradually close to closing; and as the area decreases, the capacity of resistance to plastic deformation becomes worse, which tends to be stable. The accumulated elongation of straight roots increases with increasing cycle number, which can be divided into a rapid growth stage and a slow growth stage. (4) The elastic stress, ultimate stress, and elasticity modulus of straight roots was negatively correlated with root diameter after monotonic load and cyclic load, and the accumulated elastic strain and ultimate strain have no relationship with root diameter. The elastic stress, ultimate stress, and accumulated elastic strain after cyclic loading of all diameters was enhanced, the ultimate strain was monotonic load > cyclic load, and the elastic modulus has no relationship under different loads.

Keywords: straight roots; cyclic load; tensile strength; deformation characteristic; *Salix psammophila*